

УДК 66.011

ГИДРОДИНАМИКА ВИХРЕВОЙ СУШИЛКИ ДЛЯ ВОЛОКНООБРАЗУЮЩИХ ПОЛИМЕРОВ

Л.М. КОЧЕТОВ, Б.С. САЖИН, М.Б. САЖИНА, М.П. ТЮРИН

(Московский государственный текстильный университет им. А.Н. Косыгина,
Российский заочный институт текстильной и легкой промышленности)

E-mail: sazhinbc@pochta.ru; office@roszitlp.ru

Предложены расчетные соотношения для оценки потерь напора в дисковой вихревой камере в условиях двухфазного потока газа при сушке дисперсных материалов, в частности, волокнообразующих полимеров.

Settlement ratios for an estimation of a pressure loss in the disk-type vortex chamber in the conditions of a diphasic gas flow, when drying dispersed materials, fibre-forming polymers in particular, are offered herein.

Ключевые слова: гидродинамика, вихревые сушилки, дисперсные материалы, полимерные волокна.

Рассматриваются гидродинамические особенности дисковых вихревых камер, предназначенных для сушки тонкопористых дисперсных материалов, в том числе волокнообразующих полимеров.

Дисковые вихревые камеры имеют форму короткого цилиндра с тангенциальным газосходом для входа и центральным отверстием для выхода газозвеси. Присутствие дисперсного материала в вихревой камере существенно влияет на величину и распределение скоростей газового потока, а также на величину гидравлического сопротивления камеры. За счет передачи части кинетической энергии дисперсному материалу скорость газа непосредственно за входным створом резко снижается. Степень снижения скорости возрастает с увеличением количест-

ва дисперсного материала, загруженного в камеру.

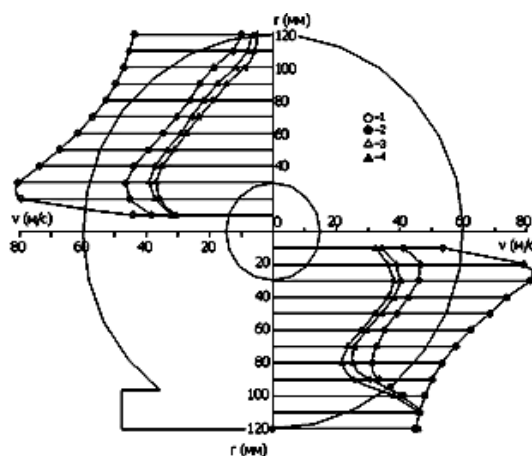


Рис. 1

На рис. 1 представлен характер изменения окружных скоростей газа вдоль вертикальной оси в камере, $R=120$ мм, при различных загрузках дисперсного материала q : 1 – $q=0$; 2 – $q=0,25q_0$; 3 – $q=0,5q_0$; 4 – $q=q_0$;

Видно, что наибольшие изменения профиля окружных скоростей имеют место в периферийной зоне камеры, где движется основная масса дисперсного материала. При этом при загрузках, составляющих менее 50% максимально возможной загрузки (удерживающей способности камеры q_0), изменения скорости газового потока наиболее существенны. При дальнейшем увеличении загрузки камеры, до значений $q=q_0$, профиль скоростей изменяется менее резко.

В центральной области камеры, за пределами периферийного кольцевого слоя материала, характер течения потока, близкий к осесимметричному, сохраняется и для двухфазной системы. При этом линии тока газа, направление которых можно было визуальнo наблюдать с помощью тонких нитей, закрепленных в различных точках камеры, в случае двухфазного потока проходят более круто, то есть отношение v_ϕ/v_r уменьшается. Это свидетельствует о снижении окружных скоростей газа в центральной зоне камеры. Линии тока газа, определенные по направлению ориентации нитей, в свободной от дисперсного материала центральной части камеры оказываются одинаковыми для различных материалов. При этом материалы могут существенно отличаться по своим свойствам, в первую очередь, по дисперсному составу. Расход газа также практически не влияет на направление линий тока, что свидетельствует об автономности значения v_ϕ/v_r по отношению к расходу газа.

Изменение профиля окружных скоростей газа в результате загрузки в камеру дисперсного материала оказывает существенное влияние на величину гидравлического сопротивления камеры.

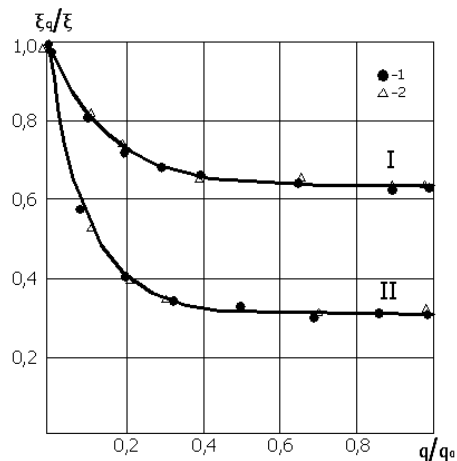


Рис. 2

На рис.2 показаны зависимости ξ_q/ξ от q/q_0 , (где ξ и ξ_q – коэффициенты сопротивления камеры в одно- и двухфазных потоках); I – $R=60$ мм; $h_1=14$ мм; $r_0=25$ мм; II – $R=240$ мм; $h_1=28$ мм; $r_0=30$ мм; 1 – сополимер ДВБ, $d_q=1,2-1,5$ мм; 2 – кварцевый песок, $d_q=0,5$ мм.

Можно отметить, что коэффициент ξ_q наиболее существенно снижается при относительно малых загрузках аппарата $q/q_0 \leq 0,4$. В дальнейшем величина ξ_q изменяется мало, достигая минимальных значений при $q \approx q_0$.

Наиболее значительное снижение величины ξ_q/ξ имеет место при небольшом радиусе центрального выходного отверстия r_0 , что обусловлено более высоким уровнем окружных скоростей потока газа в выходном створе. При этом изменения значений ξ_q/ξ происходят главным образом за счет ξ , тогда как величина ξ_q в диапазоне значений $r_0/R=0,25-0,4$ изменяется не более чем на 10% , поскольку в загруженной камере доля потерь напора в выходном створе существенно ниже, чем в однофазном потоке.

Особенностью вихревых камер, работающих с двухфазным дисперсным потоком, является постоянство потерь напора для различных материалов при одинаковых значениях расхода газа и одинаковых

относительных загрузках дисперсного материала q/q_0 .

$$h = h_1 e^{\frac{1}{R\alpha}}, \quad (1)$$

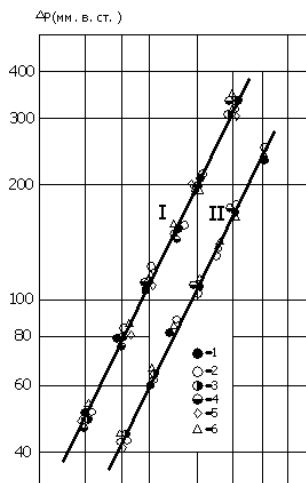


Рис. 3

На рис. 3 представлены зависимости $\Delta p = f(V)$ при $q \approx q_0$, полученные в камерах: I – $R=120$ мм; $h_1=15$ мм; $r_0=60$ мм; II – $R=120$ мм; $h_1=28$ мм; $r_0=60$ мм; для различных материалов: 1 – зерна мака; 2 – зерна проса; 3 – сополимер ДВБ, $d_{\text{ч}}=0,2\text{...}0,5$ мм; 4 – сополимер ДВБ, $d_{\text{ч}}=1,2\text{--}1,5$ мм; 5 – сополимер ДВБ, $d_{\text{ч}}=2,0\text{--}2,5$ мм; 6 – кварцевый песок.

Экспериментальные точки хорошо описываются квадратичной зависимостью. При этом значения q_0 по каждому конкретному материалу могли различаться в несколько раз. Автомодельность потерь напора в камере по отношению к физико-механическим свойствам дисперсного материала указывает на подобие полей скоростей газового потока, несмотря на существенные различия в свойствах материалов.

На участке входа (разгона твердых частиц) происходит снижение скорости газового потока, в результате чего струя газа расширяется.

Принимая, что в периферийной зоне камеры радиальный сток газа имеет место только в пределах разгонного участка камеры и распределен по нему равномерно, можно оценить величину расширения газовой струи по длине разгонного участка в результате передачи кинетической энергии дисперсному материалу [1], [2]:

где ℓ – расстояние от створа тангенциального канала до рассматриваемого сечения; α – угловой сектор, на котором происходит радиальный сток газа; h – ширина газовой струи; h_1 – высота тангенциального канала.

Для однофазного потока, с учетом осесимметричности течения газа, $\alpha = 2\pi$. В случае двухфазного потока сектор радиального стока газа уменьшается тем в большей степени, чем выше относительная загрузка камеры материалом, q/q_0 . При $q/q_0=1$ зона радиального стока уменьшается до размеров участка, на котором происходит разгон твердых частиц, а именно $\alpha \approx 2 \arccos(1 - h_1/R)$.

Степень расширения газовой струи в конце разгонного участка можно оценить по формуле (1) при $\ell=S \approx R\alpha$:

$$h_2 = e h_1. \quad (2)$$

Тогда скорость газового потока v_2 в конце разгонного участка ($\ell = S$):

$$v_2 = v_1 / e. \quad (3)$$

Из уравнения (3) можно заключить, что при $q/q_0 = 1$, скорость газового потока в конце участка разгона частиц зависит только от начальной скорости газа v_1 . Поэтому при одинаковых расходах газа и одинаковой конфигурации входного створа наблюдается аналогичность полей скоростей газа в камере независимо от свойств дисперсного материала. Это обстоятельство обуславливает постоянство потерь напора для различных материалов при одинаковых значениях расхода газа и одинаковых относительных загрузках дисперсного материала q/q_0 . Как видно из уравнения (3), скорость газа v_2 значительно меньше скорости v_1 , в результате чего окружная скорость газа на уровне выходного центрального отверстия камеры достигает в соответствии с уравнением (1) меньших значений, что обуславливает меньшие потери напора в аппарате.

Суммарные потери напора в вихревой камере в присутствии твердой фазы, как и для однофазного потока, определяются как сумма потерь напора непосредственно при входе газового потока в камеру $\Delta P_{\text{ВХ}}$, потерь напора в объеме камеры $\Delta P_{\text{ОБ}}$ и потерь напора при выходе потока газа из камеры $\Delta P_{\text{ВЫХ}}$. Однако, в отличие от однофазного потока, в этом случае основная доля общих потерь приходится на величину $\Delta P_{\text{ВХ}}$. Принимая во внимание, что статическое давление вдоль газовой струи, поступающей в камеру, остается практически неизменным, потери напора газа при входе в камеру можно охарактеризовать уравнением:

$$\Delta p_{\text{ВХ}} = \frac{1}{2} \rho_{\Gamma} v_1^2 (1 - 1/e^2 + \xi_1) = \xi_{\text{ВХ}} \frac{1}{2} \rho_{\Gamma} v_1^2, \quad (4)$$

где $\xi_{\text{ВХ}} = (1 - 1/e^2 + \xi_1)$.

Потери напора в объеме камеры $\Delta P_{\text{ОБ}}$, в случае двухфазного потока, можно определить по тем же уравнениям, что и для однофазного потока [3]. При этом значение коэффициента C определяется из соотношения:

$$C_2 = v_2 R^k.$$

Тогда:

$$\Delta P_{\text{ОБ}} = \xi_{\text{ОБ}} \frac{\rho_{\Gamma} v_1^2}{2}, \quad (5)$$

где

$$\xi_{\text{ОБ}} = \frac{R^{2k}}{k e^2} \left(\frac{1}{r_0^{2k}} - \frac{1}{R^{2k}} \right) + \frac{1}{e^2} \left[1 - \left(\frac{R}{r_0} \right)^{2k} \right] + \frac{h_1^2}{4\pi^2} \left[\frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_0^2} \right].$$

Пренебрегая значением последнего слагаемого, получим:

$$\xi_{\text{ОБ}} \approx \frac{1}{e^2} \left(\frac{1-k}{k} \right) \left[\left(\frac{R}{r_0} \right)^{2k} - 1 \right]. \quad (6)$$

В створе центрального выходного отверстия камеры окружные скорости газа, как и в случае однофазного потока, достигают максимальных значений. Для этого уровня величина окружных скоростей газа может быть охарактеризована уравнением:

$$v_{\text{мф}} = v_2 (R / r_m)^k = (R / m r_0)^k v_1 / e, \quad (7)$$

где $r_m = m r_0$ – радиус зоны максимальных окружных скоростей газа.

$$v_{\text{мр}} = \frac{V}{2\pi B r_m} = \frac{v_1 h_1}{2\pi m r_0}. \quad (8)$$

Абсолютная скорость газа на уровне выходного створа:

$$v_m = (v_{\text{мф}}^2 + v_{\text{мр}}^2)^{0.5}. \quad (9)$$

Тогда потери напора в выходном створе составят:

$$\Delta p_{\text{ВЫХ}} = \xi_{\text{ВЫХ}} \frac{\rho_{\Gamma} v_1^2}{2}, \quad (10)$$

$$\text{где } \xi_{\text{ВЫХ}} = \frac{(R / m r_0)^{2k}}{e^2} + \left(\frac{h_1}{2\pi m r_0} \right)^2.$$

Учитывая, что величина второго слагаемого уравнения мала по сравнению с первым, получим:

$$\xi_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{e^2} (R / r_0)^{2,3k}. \quad (11)$$

Полные потери напора в камере, заполненной материалом до значения ее удерживающей способности q_0 , определяются по уравнению:

$$\Delta p = \xi \frac{v_1^2}{2g} \rho_{\Gamma}, \quad (12)$$

где общий коэффициент сопротивления ξ , как и для однофазного потока, является суммой частных коэффициентов ($\xi = \xi_{\text{ВХ}} + \xi_{\text{ОБ}} + \xi_{\text{ВЫХ}}$).

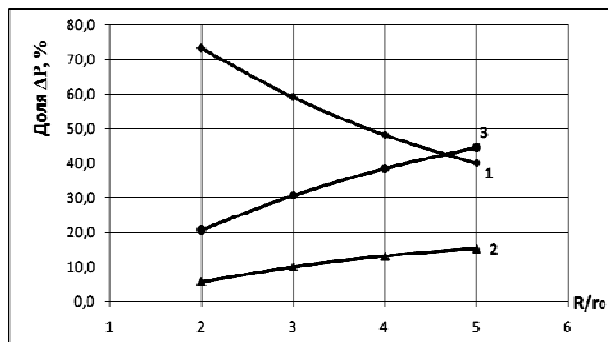


Рис. 4

На рис. 4 представлены расчетные зависимости относительных потерь напора $\Delta P_{вх}$; $\Delta P_{об}$; и $\Delta P_{вых}$ в вихревой камере от отношения R/r_0 для двухфазного потока газа при $q=q_0$. Расчеты были выполнены для значений: $\varepsilon = 0,95$ и $k = 0,65$.

Видно, что, как и для однофазного потока, с увеличением отношения R/r_0 доля потерь напора при входе газа в камеру уменьшается, тогда как доля потерь напора в объеме камеры и при выходе из нее возрастают. Также видно, что для двухфазного потока, 40...70% общих потерь напора приходится на входной створ камеры, тогда как потери напора в объеме и в выходном створе камеры ниже, особенно при малых значениях R/r_0 . Такой характер распределения потерь напора объясняется более низким, чем для однофазного потока, уровнем окружных скоростей газа в выходном створе камеры.

ВЫВОДЫ

1. Предложены расчетные соотношения для оценки потерь напора в дисковой вихревой камере в условиях двухфазного дисперсного потока газа.

2. Показано, что общий коэффициент сопротивления ξ не зависит от расхода газа и при определенных геометрических соотношениях камеры является величиной постоянной.

3. Установлено, что зависимость потерь напора в вихревой камере как в случае однофазного, так и двухфазного потоков, от расхода газа имеет квадратичный характер, что подтверждается результатами экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кочетов Л.М., Сажин Б.С., Тюрин М.П., Отрубянников Е.В. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – № 3, 2008.
2. Кочетов Л.М., Сажин Б.С., Отрубянников Е.В. Расчет продолжительности обработки дисперсных материалов в вихревых сушилках/ Изв. вузов. Химия и химическая технология – 2010, №4. Т.53.
3. Кочетов Л.М., Сажин Б.С., Тюрин М.П., Сажина М.Б. Математическая модель гидродинамики вихревой сушилки для волокнообразующих полимеров // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2010, №4.

Рекомендована кафедрой процессов и аппаратов химической технологии и безопасности жизнедеятельности МГТУ им. А.Н. Косыгина. Поступила 01.10.10.